

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622766>

Оригинальное исследование



Сравнительные испытания форсунок дизелей с серийными и модернизированными распылителями

А.Л. Болотоков¹, И.П. Трояновская^{2, 3}, С.А. Войнаш⁴¹ Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, Нальчик, Российская Федерация;² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация;³ Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Российская Федерация;⁴ Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Более 60% отказов сельскохозяйственных тракторов связано с отказом дизельного двигателя. Половина отказов дизельных двигателей приходится на систему топливоподачи, где большая часть определяется ресурсом распылителей дизельных форсунок.

Цель исследования — увеличение долговечности форсунки путем модернизации иглы распылителя.

Методы. Для повышения рабочего ресурса распылителя дизельной форсунки было предложено новое техническое решение, заключающееся в нанесении винтового канала на несущую поверхность иглы. Наличие винтового канала приводит к возникновению осесимметричного давления на иглу, что придает ей повышенную устойчивость и предотвращает вероятность перекоса и зависания. На данное изобретение получен патент Российской Федерации. Для подтверждения предполагаемого эффекта были проведены сравнительные лабораторные испытания с серийной и модернизированной конструкцией распылителя. Для проведения ускоренных испытаний использовалось «запыленное» топливо, полученное путем добавления абразива кварцевого песка. В ходе испытаний оценивались: качество распыления, герметичность запирающего конуса, гидравлическая плотность, ход иглы и эффективное пропускное сечение. Оценка износа сопрягаемых поверхностей распылителя определялась по величине гидравлической плотности.

Результаты. В результате эксперимента получено, что у серийных форсунок предельное значение гидравлической плотности наступает после наработки 2500 моточасов и характеризуется нарушением герметичности. У модернизированных форсунок предел гидравлической плотности наступает после наработки 4300 моточасов.

Заключение. Нанесение винтового канала на несущей поверхности иглы позволяет увеличить ресурс дизельной форсунки на 23%.

Ключевые слова: дизель; распылитель; форсунка; испытание; ресурс; модернизация.

Как цитировать:

Болотоков А.Л., Трояновская И.П., Войнаш С.А. Сравнительные испытания форсунок дизелей с серийными и модернизированными распылителями // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 2. С. 243–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622766>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622766>

Original Study Article

Comparative tests of diesel injectors with current and upgraded nozzles

Anzor L. Bolotokov¹, Irina P. Troyanovskaya^{2, 3}, Sergey A. Voinash⁴

¹ Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russian Federation;

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

³ South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russian Federation;

⁴ Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: More than 60% of agricultural tractor failures are due to diesel engine failure. Half of diesel engine failures relate to the fuel supply system, which is mainly dependent on the service life of diesel injectors' nozzles.

AIM: Increasing the durability of the nozzle by means of upgrading the nozzle needle.

METHODS: To increase the working life of the diesel injector nozzle, a new technical solution, the idea of which is applying a screw channel to the bearing surface of the needle, was proposed. The presence of the screw channel leads to axisymmetric pressure on the needle, which gives it increased stability and prevents the possibility of skewing and freezing. The Russian patent has been received for this invention. To confirm the expected effect, comparative laboratory tests were carried out with current and upgraded nozzle design. To carry out accelerated tests, the "dusty" fuel, obtained by adding quartz sand abrasive, was used. During the tests, the following were assessed: atomization quality, sealing cone tightness, hydraulic density, needle stroke and effective flow area. The assessment of wear of the mating surfaces of the nozzle depends on the value of the hydraulic density.

RESULTS: As a result of the experiment, it was found that the limiting value of hydraulic density for the current injectors occurs after 2500 operating hours and is characterized by a violation of tightness. For the upgraded injectors, the hydraulic density limit occurs after 4300 operating hours.

CONCLUSION: Applying a screw channel on the bearing surface of the needle helps to increase the service life of the diesel injector by 23%.

Keywords: diesel; nozzle; injector; test; service life; upgrade.

To cite this article:

Bolotokov AL, Troyanovskaya IP, Voinash SA. Comparative tests of diesel injectors with current and upgraded nozzles. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(2):243–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622766>

Received: 27.10.2023

Accepted: 04.06.2024

Published online: 04.06.2024

Разница давлений способствует центровке иглы и уменьшает ее перекося по всей длине направляющей. Принудительное перемещение иглы придает ей дополнительную устойчивость. Модернизация иглы распылителя топливной форсунки снизила вероятность перекося, «прихватывания» и зависания иглы.

Модернизация форсунки способствует: повышению ее надежности, улучшению качества распыления и обеспечению равномерного износа рабочих поверхностей, увеличивая тем самым долговечность. Новое техническое решение защищено патентом Российской Федерации [9]. На основе нового технического решения были изготовлены 3 комплекта (12 штук) опытных образцов модернизированной форсунки, участвующие в экспериментальных исследованиях (рис. 2).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИСПОЛЪЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Характеристики впрыска топливной системы проводили на безмоторной установке, где регистрация параметров осуществлялась с помощью осциллографа. Осциллограф был подключен к персональному компьютеру, что позволило в автоматическом режиме проводить обработку полученных результатов (рис. 3).

Перед началом всех этапов испытаний обязательно регулировалось давление впрыскивания $P = 17,5$ МПа (погрешность манометра $\pm 0,5$ МПа). Расход топлива Q определялся весовым способом. Масса навески $G = 500$ г (погрешность весов ± 5 г), время наполнения составило $\tau = 15$ с (погрешность секундомера $\pm 0,2$ с). В качестве рабочей жидкости использовалось дизельное топливо массовой плотностью $\gamma = 0,823$ г/см³ [11]. Все опыты проводились с трехкратной повторностью.

Топливные насосы высокого давления были отрегулированы на номинальные подачи. Согласно заводской инструкции угол опережения впрыскивания составлял 24°.

Частота вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления контролировалась тахометром СК ТИЦ-751. Для исключения накапливания топлива в топливоборочных камерах датчиков в направляющих втулках корпусов датчиков были прорезаны продольные пазы.

Эффективное проходное сечение f_{μ} распылителя форсунки определялось по перепаду давлений в начале и в конце впрыска ΔP :

$$f_{\mu} = \frac{100Q}{\tau\sqrt{2g\gamma\Delta P}}, \quad (1)$$

где Q — расход топлива (г); $\tau = 15$ с — время топливоподачи; $\gamma = 0,823$ — плотность топлива (кг/см³); $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; $\Delta P = 5$ МПа — перепад давления.

Параметры и регулировка форсунок проводилась на стенде испытательном КИ-35478 (рис. 4).

Наиболее объективным показателем износа распылителей во время сравнительных износных испытаний был принят показатель снижения гидравлической плотности форсунок. Согласно ГОСТ 10579-88 [12] гидравлическая плотность при стендовых испытаниях определялась:

$$G = G_o + A\tau; \quad (2)$$

где G_o — исходная гидравлическая плотность на стенде (с); A — коэффициента интенсивности изменения гидравлической плотности в зависимости от наработки; τ — наработка (мото-часы).

Герметичность, ход иглы и качество распыления топлива определялись на приборе КИ-3333 (рис. 5).

При ускоренных испытаниях использовалось на «запыленном» топливе, полученном путем добавления к 1 тонне топлива 50 г абразива в виде кварцевого порошка зернистостью 1–2 мкм [13]. Один час работы топливной



Рис. 2. Распылители форсунки ФД-22 с (а) модернизированной и (б) серийной иглой.

Fig. 2. The FD-22 injector nozzles with (a) the upgraded and (b) the current needle.

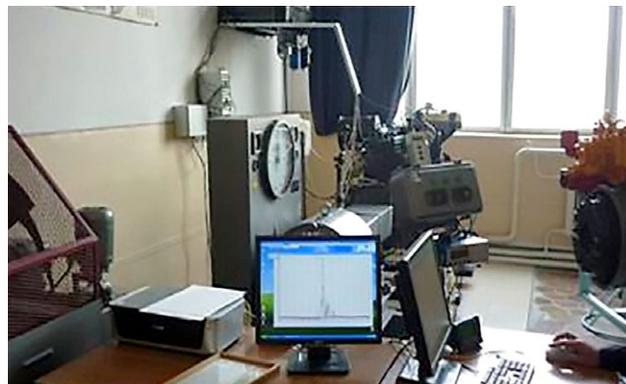


Рис. 3. Тензометрическая станция УТС1-ВТ-12/35 для замеров подачи топлива.

Fig. 3. The UTS1-VT-12/35 strain gauge station for fuel supply measuring.

аппаратуры в условиях с «запыленным» топливом соответствует 50 часам работы в условиях реального сельскохозяйственного производства.

Все испытание разбивалось на этапы продолжительностью по 10 ч (соответствует наработке 500 моточасов). После каждого этапа работы на стенде «запыленное» топливо заменяли на чистое. По истечению небольшого времени работы форсунки снимались со стенда и проводили контроль состояния распылителей. Для этого в лаборатории замерялся зазор между сопряженными деталями. Замер проводился ротаметром и оптикатором с ценой деления 0,2 мкм [14].

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку, в зависимости от времени работы меняется эффективное проходное сечение (1) и гидравлическая плотность (2), то эти параметры можно использовать для оценки износа в зависимости от наработки.

Уровни варьирования этих параметров представлены в таблице 1.

Для рассмотрения всех возможных сочетаний необходимо реализовать 9 вариантов (табл. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительные результаты испытаний комплекта серийных и модернизированных распылителей при 10 часах работы на стенде (наработка 500 моточасов) представлены в таблице 3. В числителе представлены значения серийных форсунок, в знаменателе — модернизированных.

Данные табл. 3 показывают, что после наработки 500 моточасов у серийных распылителей 2 и 4 секции топливного насоса высокого давления ухудшилась герметичность запирающего корпуса, что повлияло на качество распыления. Кроме того, у серийных форсунок наблюдается явное падение подвижности иглы после наработки 500 моточасов. В тоже время, у модернизированных распылителей практически не наблюдается изменение



Рис. 4. Стенд КИ-35478 для испытания дизельных форсунок.
Fig. 4. The KI-35478 bench for diesel injectors testing.



Рис. 5. Прибор КИ-3333 для испытания и регулировки форсунок.
Fig. 5. The KI-3333 device for nozzles testing and adjusting.

Таблица 1. Уровни варьирования гидравлической плотности и эффективного проходного сечения

Table 1. Levels of variation in hydraulic density and effective flow area

Гидравлическая плотность Γ , с				Эффективное проходное сечение f_{μ} , мм ²			
верхний	основной	нижний	интервал	верхний	основной	нижний	интервал
31	20	9	11	0,267	0,253	0,240	0,150

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Table 2. The design of experiment matrix

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Γ , с	31	31	31	20	20	20	9	9	9
f_{μ} , мм ²	0,267	0,253	0,240	0,267	0,253	0,240	0,267	0,253	0,240

эксплуатационных параметров. Все модернизированные распылители показали соответствие техническим условиям.

По данным таблицы 3 была построена зависимость Γ гидравлической плотности и f_{μ} эффективного проходного сечения в зависимости от наработки (см. рис. 6).

По результатам ускоренных лабораторных испытаний были построены зависимости гидравлической плотности для серийных и модернизированных форсунок (см. рис. 7).

В результате получено, что при наработке первых 500 мото-часов гидравлическая плотность возрастает в среднем на 20–35%. При наработке 1500–2500 мото-часов

по причине износа гидравлической плотности начинает падать. Износ проявляется на сопряженных поверхностях иглы и корпуса распылителя.

После наработки в районе 2500–3000 мото-часов наступает резкое падение гидравлической плотности, которое проявляется в нарушении герметичности запирающего корпуса. Модернизированные распылители имеют предельно-допустимую гидравлическую плотность ($\Gamma = 5$ с) при наработке 4300 мото-часов. Указанное обстоятельство доказывает увеличение ресурса форсунки на 23% за счет использования винтового канала на направляющей части иглы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения рабочего ресурса дизельных форсунок предложено на направляющей части иглы нанести

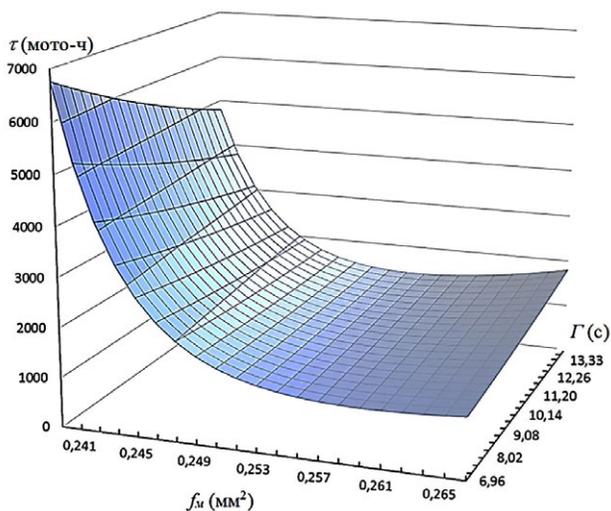


Рис. 6. Изменение гидравлической плотности Γ и эффективного проходного сечения f_{μ} в зависимости наработки τ .
Fig. 6. Change in hydraulic density Γ and effective f_{μ} flow area depending on operating time.

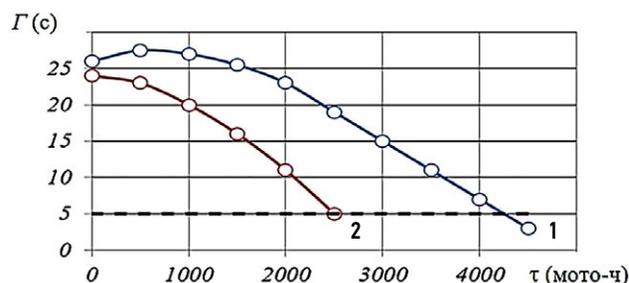


Рис. 7. Изменение гидравлической плотности в зависимости от времени наработки в процессе ускоренных стендовых испытаний (1) модернизированных и (2) серийных распылителей.
Fig. 7. Change in hydraulic density depending on operating time during accelerated bench tests of (1) the upgraded and (2) the current nozzles.

Таблица 3. Результаты испытаний форсунок 4 секций топливного насоса высокого давления в процессе 10 часов работы на стенде
Table 3. Test results of injectors of 4 sections of the high-pressure fuel pump during 10 hours of operation on the bench

Секция топливного насоса высокого давления	Наработка τ , мото-ч	Оцениваемый показатель				
		Давление впрыска P , МПа	Качество распыления топлива*1	Герметичность запирающего конуса*2	Гидроплотность Γ , с	Ход иглы, мм
1 секция	0	18/18	+/+	+/+	15/20	0,270/0,240
	500	16,8/16,8	+/+	+/+	18/18	0,265/0,240
2 секция	0	18/18	+/+	+/+	16/16	0,265/0,235
	500	17/17	-/+	-/+	15/17	0,255/0,235
3 секция	0	18/18	+/+	+/+	12/22	0,215/0,240
	500	17/17	+/+	+/+	14/19	0,215/0,240
4 секция	0	18/18	+/+	+/+	18/18	0,265/0,270
	500	16,9/16,9	-/+	-/+	16/16	0,265/0,270

*1 «+» соответствует хорошему качеству распыления, «-» соответствует удовлетворительному качеству распыления топлива;
 *2 «+» соответствует хорошей герметичности, «-» соответствует нарушению герметичности (начало подтекания).

винтовой канал. Такое техническое решение приводит к возникновению осесимметричному давлению на иглу, что придает ей дополнительную устойчивость, снижает вероятность перекоса и зависания иглы. Новизна модернизированной конструкции иглы запатентована.

Сравнительные лабораторные испытания серийной и модернизированной конструкции распылителя дизельной форсунки показали, что серийных форсунок предельное значение гидравлической плотности наступает после наработки 2500 мото-часов и характеризуется нарушением герметичности. У модернизированных форсунок предельное значение гидравлической плотности наступает после наработки 4300 мото-часов, что позволяет говорить об увеличении ресурса на 23%.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов: А.Л. Болотоков — научная идея изобретения; непосредственное проведение самих лабораторных исследований; подготовка отчета о проделанной работе; И.П. Трояновская — выбор темы исследований; разработка методики эксперимента; помощь в обработке результатов; написание текста рукописи, редактирование окончательной версии статьи; перевод аннотации; А.С. Войнаш — изготовление опытных образцов модернизированных распылителей; поиск публикаций по теме статьи; отработка изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования

и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.L. Bolotokov — the scientific idea of the invention; direct conduct of laboratory research; preparation of a report on the work done; I.P. Troyanovskaya — choosing a research topic; development of the experimental methodology; assistance in results processing; writing the text of the manuscript, editing the final version of the article; translation of the abstract; A.S. Voinash — production of prototypes of upgraded nozzles; search for publications on the topic of the article; making figures. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. The present study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краснокутский В.В., Русанов М.А., Трояновская И.П. Системы питания дизельных двигателей. Ч. 1. Назначение и конструкция. Челябинск: ЮУрГУ, 2017.
2. Краснокутский В.В., Русанов М.А., Трояновская И.П. Системы питания дизельных двигателей. Ч. 2. Топливные насосы высокого давления. Челябинск: ЮУрГУ, 2017.
3. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A., Batyrov V.I., Shekikhacheva L.Z. Influence of non-uniformity of fuel supply parameters on diesel engine performance. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. Vol. 1678. P. 42063. doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042063
4. Гурин Т.Ю. Повышение долговечности форсунок автотракторных дизелей модернизацией распылителей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2010.
5. Батыров В.И., Губжиков Х.Л., Болотоков А.Л. Особенности работы дизеля в высокогорных условиях // *Сельский механизатор.* 2017. № 2. С. 20–25.
6. Батыров В.И., Болотоков А.Л. Повышение надежности работы распылителя форсунки дизелей // *Техника в сельском хозяйстве.* 2012. № 3. С. 12–15.
7. Markov V., Devyanin S., Kamaltdinov V., Sa B. Improvement of Design of Diesel Injector Nozzles // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. Vol. 678 (1). P. 012008. doi: 10.1088/1755-1315/678/1/012008
8. Bolotokov A., Gubzhokov H., Ashabokov K., et al. Improving the Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Diesel Engine // *E3S Web of Conferences.* 2023. Vol. 411. No. 01045. doi: 10.1051/e3sconf/202341101045
9. Патент на изобретение РФ 2231673/ 27.06.2004. Бюл. №15. Хаширов Ю. М., Бугов Х.У., Болотоков А.Л. Распылитель дизельной форсунки. EDN: QICOPD
10. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1988.
11. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1982.
12. ГОСТ 10579-88. Форсунки дизелей. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1988.
13. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1980.
14. Veselovsky A., Troyanovskaya I., Syromyatnikov Y., et al. Features of Wear of Gears of Agricultural Machinery // *Acta Technologica Agriculturae.* 2023. Vol. 4. P. 207–214. doi: 10.2478/ata-2023-0028

REFERENCES

1. Krasnokutsky VV, Rusanov MA, Troyanovskaya IP. *Diesel engine power systems. Part 1. Назначение и конструкция. Purpose and design.* Chelyabinsk: YuUrGU; 2017. 72 p. (in Russ).
2. Krasnokutsky VV, Rusanov MA, Troyanovskaya IP. *Diesel engine power systems. Part 2. High pressure fuel pumps.* Chelyabinsk: YuUrGU; 2017. 61 p. (in Russ).
3. Apazhev AK, Shekikhachev YA, Batyrov VI, Shekikhacheva LZ. Influence of non-uniformity of fuel supply parameters on diesel engine performance. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1678:42063. doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042063
4. Gurin TYu. *Increasing the durability of automotive diesel injectors by modernizing nozzles: abstract of thesis* [dissertation abstract] Novosibirsk; 2010. (in Russ).
5. Batyrov VI, Gubzhokov HL, Bolotkov AL. Features of the diesel engine in high -mountain conditions. *Rural machine operator.* 2017;2:20–25. (in Russ).
6. Batyrov VI, Bolotkov AL. Increasing the reliability of diesel injector atomizer operation. *Technology in agriculture.* 2012;3:12–15. (in Russ).
7. Markov V, Devyanin S, Kamaltdinov V, Sa B. Improvement of Design of Diesel Injector Nozzles. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021;678(1):012008. doi: 10.1088/1755-1315/678/1/012008
8. Bolotkov A, Gubzhokov H, Ashabokov K, et al. Improving the Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Diesel Engin. *E3S Web of Conferences.* 2023;411:01045. doi: 10.1051/e3sconf/202341101045
9. Patent RUS 2231673 / 27.06.2004. Bull. 15. Khashirov YuM, Bugov KhU, Bolotkov AL. *Diesel injector atomizer.* (in Russ). EDN: QICOPD
10. GOST 18509-88. Tractor and combine diesel engines. Bench test methods. Moscow: Izd-vo standartov; 1988. (in Russ).
11. GOST 305-82. Diesel fuel. Technical conditions. Moscow : Izd-vo standartov; 1982. (in Russ).
12. GOST 10579-88. Diesel injectors. General technical conditions. Moscow : Izd-vo standartov; 1988. (in Russ).
13. GOST 3647-80. Grinding materials. Classification. Grain size and grain composition. Moscow : Izd-vo standartov; 1980. (in Russ).
14. Veselovsky A, Troyanovskaya I, Syromyatnikov Y, et al. Features of Wear of Gears of Agricultural Machinery. *Acta Technologica Agriculturae.* 2023;4:207–214. doi: 10.2478/ata-2023-0028

ОБ АВТОРАХ

* Трояновская Ирина Павловна,

Почетный машиностроитель РФ, профессор, д-р техн. наук, профессор кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие»; профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины»;
адрес: Российская Федерация; 454080, Челябинск, пр-т Ленина, д.76;
ORCID: 0000-0003-2763-0515;
eLibrary SPIN: 6845-7532;
e-mail: tripav63@mail.ru

Болотоков Анзор Леонидович,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Технологии обслуживания и ремонт машин в АПК»;
ORCID: 0000-0002-2977-4072;
eLibrary SPIN: 7116-4270;
e-mail: anzor.n@inbox.ru

Войнаш Сергей Александрович,

инженер, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальной мобильности Института дизайна и пространственных искусств;
ORCID: 0000-0001-5239-9883;
eLibrary SPIN: 9532-4604;
e-mail: sergey_voi@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

* Irina P. Troyanovskaya,

Honorary Mechanical Engineer of the Russian Federation, Professor, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Tractors, Agricultural Machinery and Arable Farming Department, Professor of the Wheeled and Tracked Vehicles Department;
address: 76 Lenina Avenue, 454080 Chelyabinsk, Russian Federation;
ORCID: 0000-0003-2763-0515;
eLibrary SPIN: 6845-7532;
e-mail: tripav63@mail.ru

Anzor L. Bolotkov,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Technology for Maintenance and Repair of Machines in the Agricultural Industry Department;
ORCID: 0000-0002-2977-4072;
eLibrary SPIN: 7116-4270;
e-mail: anzor.n@inbox.ru

Sergey A. Voinash,

Engineer, Junior Researcher at the Intelligent Mobility Laboratory of the Institute of Design and Spatial Arts;
ORCID: 0000-0001-5239-9883;
eLibrary SPIN: 9532-4604;
e-mail: sergey_voi@mail.ru